

# IMAGERIE PAR TOMOGRAPHIE ÉLECTRIQUE RÉSISTIVE DE LA DISTRIBUTION DES PHASES DANS UNE COLONNE À BULLES

---

E. Fransolet, M. Crine, G. L'Homme,  
P. Marchot, D. Toye.

Laboratoires de Génie Chimique,  
Université de Liège Belgique

---

## Résumé

La tomographie électrique résistive, technique de mesure non intrusive et de haute résolution temporelle, est utilisée pour l'étude de l'hydrodynamique d'une colonne à bulles. Cette technique permet d'obtenir des images de la distribution des phases au sein de la colonne et de déterminer le régime hydrodynamique en présence. En outre, les résultats présentés ici montrent que l'E.R.T. (Electrical Resistance Tomography) permet également de détecter un dysfonctionnement de la colonne, comme une mauvaise distribution du gaz résultant du bouchage du distributeur.

## INTRODUCTION

Les colonnes à bulles sont largement utilisées dans l'industrie chimique pour la mise en œuvre de réactions gaz-liquide et gaz-liquide-solide. Leur hydrodynamique est très complexe et se caractérise par l'existence de différents régimes d'écoulement, dont l'apparition, pour une géométrie et un système gaz-liquide donnés, dépend essentiellement de la vitesse superficielle du gaz. On distingue principalement le régime à bulles ou régime homogène, apparaissant aux faibles débits de gaz et le régime turbulent ou régime hétérogène, apparaissant aux débits de gaz les plus élevés. Un régime de transition est observé aux débits de gaz intermédiaires. Le but de la présente étude est de mesurer la distribution de la rétention gazeuse dans chacun des régimes hydrodynamiques successivement observés en faisant varier la vitesse superficielle du gaz. La technique de mesure utilisée est la tomographie résistive électrique (E.R.T.), dont le principe est de reconstruire la carte de distribution de la conductivité électrique dans la section droite d'un objet à partir de mesures de différence de potentiel réalisées entre des électrodes disposées sur sa périphérie. Cette technique se base sur le fait que la différence de potentiel mesurée entre deux électrodes est fonction de la conductivité du milieu qui les sépare et n'est donc applicable que lorsque l'objet analysé est globalement conducteur. Par rapport aux techniques traditionnellement utilisées pour étudier l'hydrodynamique au sein des colonnes à bulles (capteurs de pression, sondes optiques ou conductimétriques), l'E.R.T. présente le double avantage d'être une méthode non intrusive et de fournir une information bidimensionnelle sur la distribution des phases. En outre, cette technique permet d'obtenir plus de 10 images par seconde et présente donc une résolution temporelle nettement supérieure à celles des autres techniques tomographiques (R.X., R.γ.). La résolution spatiale des images obtenues par E.R.T. est quant à elle de l'ordre de 10 % du diamètre de l'objet ausculté.

## **DISPOSITIF EXPERIMENTAL**

Le dispositif expérimental (fig. 1) est principalement constitué d'une colonne en PVC transparent de 2.75 m de haut et de 0.24 m de diamètre, remplie d'eau et alimentée en pied par de l'air comprimé via un distributeur uniforme en forme de peigne, percé de 203 trous de 1 mm de diamètre (fig. 2a) . La colonne fonctionne en mode batch sur la phase liquide et en mode continu sur la phase gazeuse. Le dispositif de tomographie (I.T.S.) est composé de 2 plans comprenant chacun 16 électrodes uniformément réparties à la périphérie de la colonne. Les plans tomographiques sont respectivement situés à une distance de 0.21 et de 0.35 m au-dessus du distributeur de gaz. La stratégie de mesure choisie est celle des 'électrodes adjacentes', qui consiste à injecter un courant de 15 mA entre deux électrodes adjacentes à 9600 Hz et à mesurer la différence de potentiel induite par ce courant entre tous les autres couples d'électrodes adjacentes, en excluant les couples dans lesquels interviennent les deux électrodes d'injection. Cette action est alors répétée en utilisant tous les autres couples d'électrodes d'injection. Les images de la distribution de la conductivité sont reconstruites à partir des 104 valeurs de différence de potentiel ainsi mesurées, grâce à un algorithme de rétro-projection linéaire. Cet algorithme est dit 'qualitatif', dans le sens où les pixels composant les images obtenues représentent, non pas une valeur absolue de la conductivité mais plutôt une valeur relative de celle-ci, par rapport à une image réalisée dans des conditions de référence. Les mesures sont réalisées à raison de 10 images/s et les images 2D de la rétention gazeuse sont directement déduites des images 2D de la conductivité.

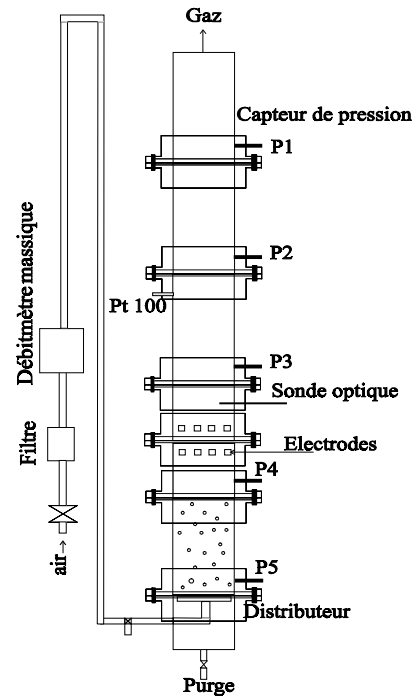


Fig. 1 : Dispositif expérimental

## **RESULTATS EXPERIMENTAUX**

L'E.R.T a tout d'abord été utilisée pour mesurer la distribution de rétention gazeuse au sein de la colonne en air via un distributeur uniforme (fig. 2a). Les figures 2.b et 2.c montrent les images obtenues pour deux valeurs de vitesses superficielles de gaz, 0.02 m/s et 0.11 m/s, correspondant respectivement à un fonctionnement de la colonne en régime homogène et en régime hétérogène.

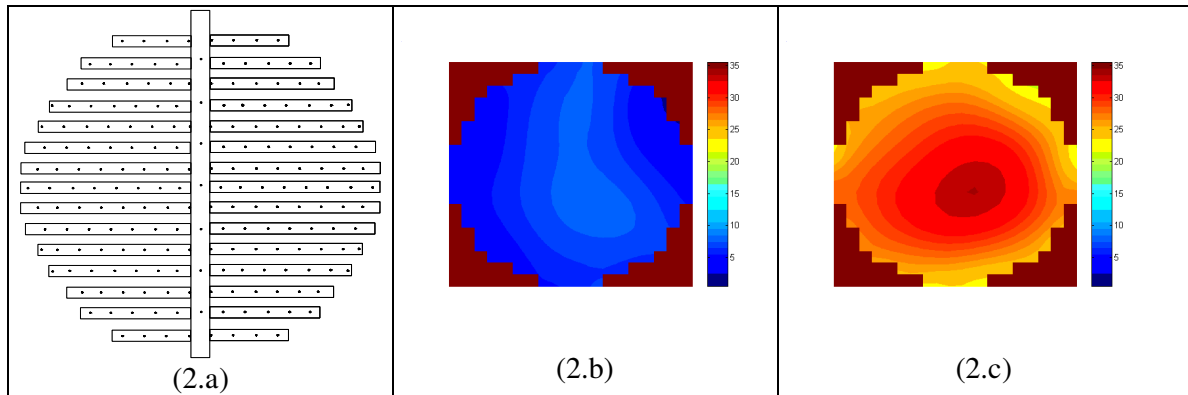


Fig 2 : (a) Schéma du distributeur de gaz, (b) en régime homogène ( $u_g = 0.02$  m/s), (c) en régime hétérogène ( $u_g = 0.11$  m/s)

L'examen des images montre que, conformément aux résultats rapportés dans la littérature (1, 2, 3), les valeurs de rétention gazeuse augmentent quand la vitesse superficielle du gaz s'accroît. Un examen plus approfondi montre également, qu'en régime homogène (fig. 2b), l'image de la distribution de la rétention est relativement uniforme ( $\epsilon_g$  varie de 0.03 à 0.08) tandis qu'en régime hétérogène (fig. 2c), un profil de rétention plus marqué apparaît, avec des valeurs nettement plus élevées au centre ( $\epsilon_g = 0.35$ ) qu'à la paroi ( $\epsilon_g = 0.21$ ). Sur base des images obtenues par E.R.T., il est donc possible de distinguer le régime homogène du régime hétérogène. Il s'agit donc d'une technique de mesure permettant de déterminer le régime hydrodynamique existant au sein de la colonne.

Nous avons ensuite testé les capacités de l' E.R.T. à détecter une maldistribution du gaz au sein de la colonne, résultant d'un bouchage partiel du distributeur. Nous avons réalisé plusieurs séries d'essais pour différentes géométries de distribution initiales de gaz. A chaque géométrie étudiée a été attribué un nom, précisant la zone dans laquelle le gaz est effectivement injecté :

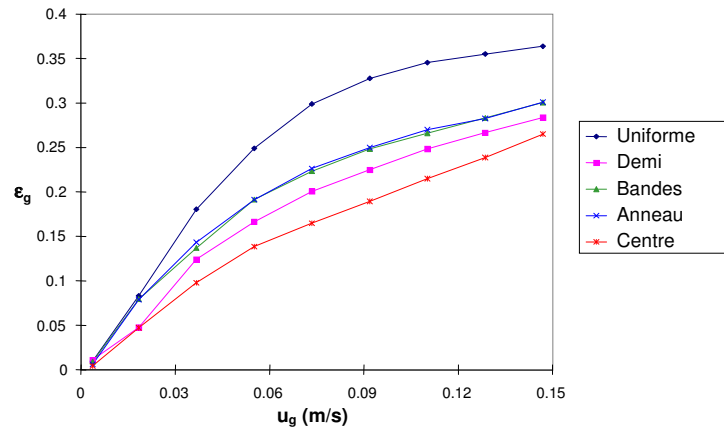
- géométrie « demi » : le gaz est injecté dans une *demi* section de la colonne. Les trous situés dans l'autre moitié sont obturés.
- géométrie « anneau » : le gaz est injecté dans une *zone annulaire* située près de la paroi de la colonne. Les trous situés dans le cercle d'un rayon égal aux  $\frac{3}{4}$  du rayon de la section sont obturés.
- géométrie « centre » : le gaz est injecté au *centre* de la colonne. Les trous situés dans la zone annulaire au-delà de la moitié du rayon de la colonne sont obturés.
- géométrie « bandes » : le gaz est injecté par deux groupes de 3 tuyaux latéraux du distributeur. Les trous des autres tuyaux sont obturés.

Les parties grisées sur les figures 4a, 6a, 7a et 8a, qui illustrent les différentes géométries d'injection, permettent de visualiser les zones dans lesquelles les trous du distributeur ont été obturés. La tableau 1 reprend les caractéristiques de chaque géométrie, à savoir, le nombre effectif de trous d'injection, ainsi que le pourcentage d'orifices obturés.

**Tableau 1 : Caractéristiques des géométries d'injection**

Géométrie	Nombre effectif de trous	Pourcentage d'obturation
Uniforme	203	0
Demi	98	52
Anneau	79	61
Centre	37	82
Bandes	91	55

Les courbes représentées sur la figure 3 montrent, pour les différentes géométries d'injection, l'évolution de la rétention gazeuse moyenne en fonction de la vitesse superficielle du gaz, dans la section droite de la colonne correspondant au plan tomographique situé à 0.21 m du distributeur. Il apparaît clairement que la rétention moyenne diminue lorsque le pourcentage de trous obturés augmente, ce qui est en accord avec la littérature (4 et 5). On remarque également qu'à taux d'obturation plus ou moins équivalent (géométrie « demi » et géométrie « bandes »), une géométrie d'alimentation plus dissymétrique pénalise davantage la valeur de la rétention de gaz.



**Fig. 3 : Evolution de la rétention gazeuse moyenne en fonction de la vitesse superficielle du gaz pour différentes géométries d'injection**

Les figure 4, 6, 7 et 8 montrent l'influence de la géométrie d'injection sur la distribution de la rétention gazeuse. Les images représentées sont relatives à 2 vitesses superficielles, 0.02 m/s et 0.11 m/s, qui correspondent respectivement, lorsque l'alimentation en gaz est uniforme à un fonctionnement de la colonne en régime homogène (fig. 2b) ou en régime hétérogène (fig. 2c).

La figure 4 est relative à la géométrie « demi ». Dans les conditions du régime homogène (fig. 4b), la rétention de gaz dans la zone de la section où les trous sont obstrués est nulle. Dans les conditions du régime hétérogène (fig. 4c), par contre, la rétention mesurée dans cette zone de la colonne est non nulle. La présence de gaz dans cette partie de la section peut s'expliquer par l'existence, pour des débits de gaz élevés, de courants de recirculation. Les valeurs de rétention dans la zone non alimentée restent néanmoins nettement inférieures à celles mesurées dans la zone d'injection. Une comparaison des images représentées à la figure 4 et à la figure 2 montre qu'une injection de gaz dissymétrique (géométrie « demi ») conduit non seulement à une dissymétrie importante au niveau de la distribution du gaz au sein de la section, mais également à un étalement des valeurs locales de rétention gazeuse.

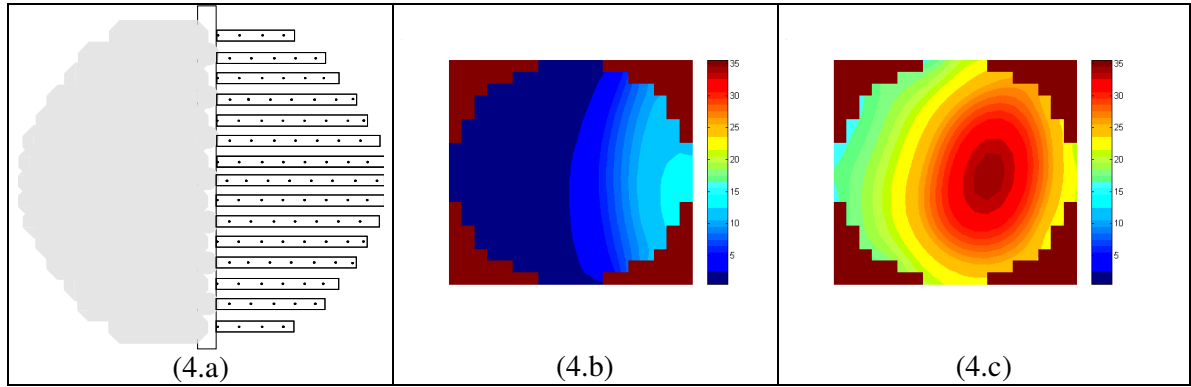


Fig 4 :(a) Géométrie « demi », Distribution du gaz à (b)  $u_g=0.02$  m/s et (c)  $u_g=0.11$  m/s.

Les courbes présentées sur la figure 5 permettent, de bien apprécier l'apport de la technique tomographique pour l'analyse de la distribution du gaz. On remarque en effet, qu'une distribution initiale asymétrique n'a que peu d'effet sur la valeur moyenne de la rétention et sera donc difficilement détectée par une technique de mesure globale comme des capteurs de pression. Les profils radiaux obtenus par tomographie sont plus frappants.

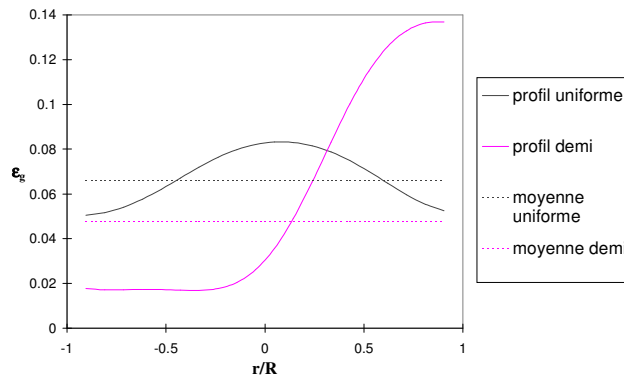


Fig.5 : Profils radiaux et valeurs moyennes de la rétention gazeuse pour les géométries « uniforme » et « demi » ( $u_g = 0.02$  m/s)

Sur la figure 6 sont représentées les images obtenues avec la géométrie « anneau », pour laquelle l'air est injecté dans une zone annulaire proche de la paroi. Pour cette configuration et dans les conditions de régime homogène (fig. 6b), les valeurs de rétention gazeuse sont plus élevées à la périphérie qu'au centre de la section. Lorsque la vitesse superficielle du gaz croît, des courants de recirculation apparaissent. Il en résulte une relative « uniformisation » des valeurs de la rétention avec apparition d'une large zone centrale dans laquelle la rétention est légèrement plus élevée (fig. 6c). Le gradient relatif de rétention gazeuse entre la paroi et le centre de la section est globalement plus faible pour la géométrie d'injection « anneau » que pour une distribution uniforme. La figure 3 montre par ailleurs que la géométrie « anneau » conduit à une rétention gazeuse moyenne plus faible que la géométrie uniforme, mais supérieure à celle de la géométrie « demi ».

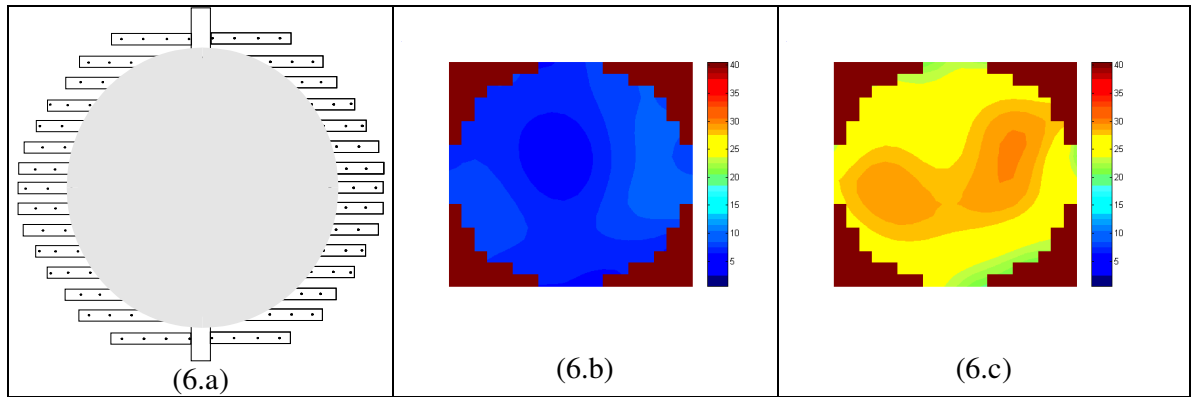


Fig.6 : Géométrie « anneau », Distribution du gaz à (b)  $u_g=0.02$  m/s et (c)  $u_g=0.11$  m/s.

Les images des figures 7b et 7c représentent des distributions de rétention gazeuse obtenues avec la géométrie d'injection « centre » pour laquelle l'air est injecté dans la partie centrale de la section. Les images montrent que la rétention gazeuse est plus élevée au centre de la section quel que soit le débit de gaz. Dans les conditions du régime homogène, la concentration de la rétention au centre de la section est essentiellement due à la géométrie d'injection tandis que pour des vitesses de gaz plus élevées, les courants de recirculation qui apparaissent accentuent encore le profil de rétention. Dans la géométrie « centre », le gradient relatif de rétention gazeuse entre la paroi et le centre de la section est globalement plus élevé que pour une distribution uniforme. La rétention moyenne obtenue avec la géométrie « centre » (fig. 3) est plus faible que celle obtenue avec la géométrie uniforme, principalement en raison du grand pourcentage de trous d'injection obturés.

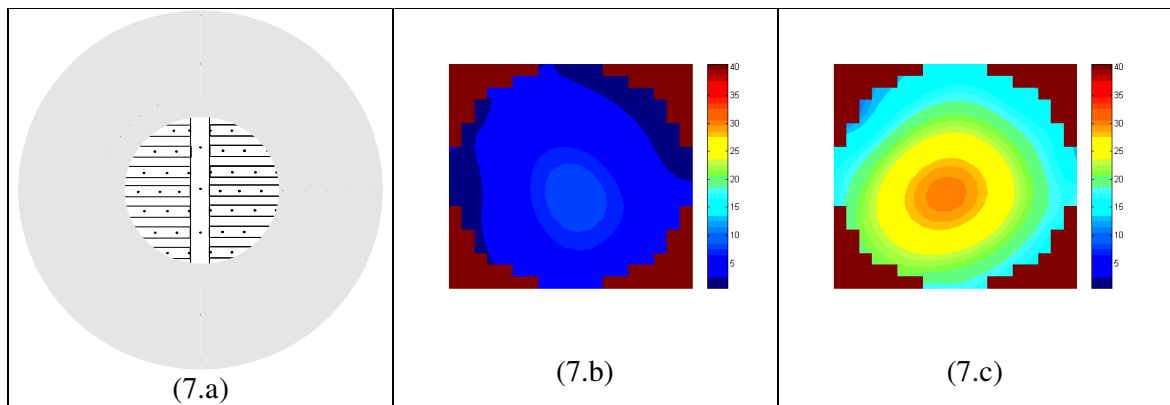


Fig .7 : (a) Géométrie « centre », Distribution du gaz à (b)  $u_g=0.02$  m/s, (c)  $u_g=0.11$  m/s.

Les images réalisées avec la géométrie d'injection « bandes » (fig. 8) permettent de mieux cerner les limites de l'E.R.T. en termes de détection d'un dysfonctionnement du distributeur. Dans cette configuration, les images de distribution obtenues, aussi bien dans les conditions du régime homogène (fig. 8b), que dans celles du régime hétérogène (fig. 8c), sont tout à fait similaires à celles obtenues avec une distribution initiale uniforme, malgré des valeurs moyennes de rétention gazeuse globalement plus faibles (fig. 3). Cette « non-détection » peut s'expliquer d'une part par la résolution spatiale limitée de la tomographie électrique qui est de l'ordre de  $1/10$  du diamètre de la section et donc assez proche de l'échelle à laquelle la maldistribution est créée, et d'autre part, par la hauteur de liquide qui sépare le plan de mesure du distributeur de gaz, et dans laquelle une certaine ré-uniformisation de la distribution du gaz peut intervenir. Au

débits de gaz élevés, l'existence de courants de recirculation accentue encore ce phénomène.

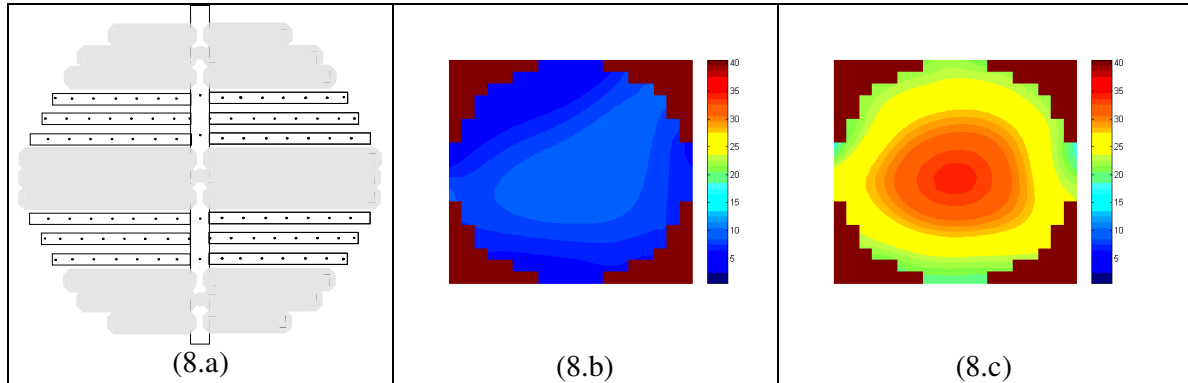


Fig 8 : (a) Géométrie « bandes », Distribution du gaz à (b)  $u_g=0.02$  m/s, (c)  $u_g=0.11$  m/s.

Suite à l'analyse détaillée des images obtenues par E.R.T., on peut donc conclure que cette technique permet de détecter un dysfonctionnement au niveau du distributeur de gaz, à condition que la maldistribution soit suffisamment importante (géométries d'injection « demi », « anneau » et « centre »). A cette condition, la maldistribution est aisément détectée, même lorsque son effet est partiellement masqué par l'influence des courants de recirculation qui apparaissent aux débits de gaz élevés.

## **CONCLUSIONS**

Les résultats présentés montrent donc que la tomographie électrique résistive est une technique performante permettant de distinguer les différents régimes hydrodynamiques au sein d'une colonne à bulles. Ils mettent également en évidence le rôle que pourrait jouer cette technique dans la détection de dysfonctionnements pouvant apparaître au sein de la colonne.

## **REFERENCES**

- (1) Deckwer, W.D., 1992, Bubble Columns Reactors, Wiley & Sons Ltd Eds, Chichester, UK.
- (2) Kumar, S.B., Moslemian, D., Dudukovic, M.P., Gas holdup measurements using computed tomography, A.I.Ch.E J., 43, 1414-1425, (1997)
- (3) Parasu Veera, U., Joshi J.B., Measurements of gas hold-up profiles by gamma ray tomography : Effect of sparger design and height of dispersion in bubble columns, Chem. Eng. Res. Des., 77(A4), 303-317 (1999)
- (4) Vial, C., Camarasa, E., Poncin, S., Wild, G., Midoux, N., Bouillard, J., Domingues, A., Study of hydronic behaviour in bubble columns and external loop airlift reactors through analysis of pressure fluctuations, Chem. Eng. Sci., 55, 2957-2973 (2000)
- (5) Drahos, J., Zahradnik, J., Puncochar, M., Fialova, M., Bradka, F., Effect of operating conditions on the characteristics of pressure fluctuations in bubble column, Chem. Eng. Process., 29, 107-115 (1991)